

## Zur Rauigkeit von automobilen Abgasmündungsgeräuschen

J. Krüger<sup>1</sup>, F. Castor<sup>1</sup>, R. Geers<sup>2</sup>

<sup>1</sup> J. Eberspächer GmbH & Co. KG, 73730 Esslingen am Neckar, Deutschland

<sup>2</sup> Fachhochschule Lübeck, 23562 Lübeck, Deutschland

### Einleitung

Beim Kauf eines Automobils im Premiumsegment spielen emotionale Komponenten neben technischen und wirtschaftlichen Aspekten eine zunehmende Rolle. Zu diesen emotionalen Komponenten gehört auch der Klang der Abgasanlage. Da der Vorbeifahrtpegel durch den Gesetzgeber limitiert wird, ist eine Betonung der Sportlichkeit durch eine abschließliche Pegelanhebung meist nicht möglich.

Dieser Beitrag beschäftigt sich daher mit dem Einfluss der psychoakustischen Größe Rauigkeit und der subjektiven Rauigkeitsempfindung von Abgasmündungsgeräuschen auf die empfundene Sportlichkeit. Hierzu wurden physikalische Messgrößen und psychoakustische Parameter mit den subjektiven Geräuschbeurteilungen verglichen.

Im Rahmen eines Hörversuchs beurteilten 20 Probanden Mündungsgeräusche verschiedener Fahrzeuge. Die Aufnahmen von Vollast-Hochläufen wurden auf einem Rollenprüfstand mit einem Kunstkopf im Abstand von 2 m hinter dem Fahrzeug vorgenommen. Neben den so gewonnenen Originalgeräuschen wurden auch durch Ordnungsfilter gezielt veränderte Sounds dargeboten. Im subjektiven Höreindruck wurde zwischen Rauigkeit und Sportlichkeit differenziert und eine statistische Auswertung vorgenommen.

### Rauigkeit

Modulationen tonaler Anteile mit bestimmten Modulationsfrequenzen werden vom menschlichen Gehör als „rau“ wahrgenommen. Der Hauptbereich der Rauigkeitsempfindung liegt bei Modulationsfrequenzen zwischen 15 und 70 Hz [1]. Die psychoakustische Rauigkeit ist allerdings nur für stationäre Geräuschereignisse definiert, wurden hier aber auch auf die Hochläufe angewendet.

Jeder Motor besitzt einen charakteristischen Klang, der durch die Motorordnungen (MO) bestimmt wird [2]. Stehen die MO in einem bestimmten Verhältnis zueinander, so ergibt sich ein Eindruck von Rauigkeit in einem spezifischen Drehzahlbereich. Eine Erweiterung bzw. Alternative zum psychoakustischen Modell der Rauigkeit stellt das in [3] beschriebene Modell der „Motorrauigkeit“ dar. Beide Modelle wurden auf die Hörbeispiele angewendet und mit den subjektiven Bewertungen verglichen.

### Hörbeispiele

Ausgehend von den Messdaten zweier Sechs- und eines Achtzylinderfahrzeuges wurde, durch eine gezielte Filterung der MO, Varianten mit höherer und geringerer Rauigkeit erzeugt. Da die Sechszylinder-Motoren bereits im Serienzustand einen wenig rauen Klangcharakter aufwiesen, be-

schränkten wir uns dabei auf jeweils eine „Rau plus-Filterung“. Von dem schon im Ursprungszustand subjektiv sehr rauen Achtzylinder-Motor leiteten wir eine „Rau minus-Variante“ ab. Die Lautheit besitzt einen großen Einfluss auf die subjektive Geräuschbewertung. Daher wurden die Hörbeispiele auf eine ähnlich Lautheit angeglichen (Abb. 1 und 2). Daraus ergaben sich sechs Hörbeispiele.

### Hörversuch

Die Hörbeispiele wurden im Eberspächer-Soundstudio automatisch über PC wiedergegeben, um jeden Einfluss des Supervisors auszuschließen. Alle Beispiele wurden zweimal, über Elektrostat-Kopfhörer mit zugeschaltetem Subwoofer, dargeboten und zwar in anonymer und zufälliger Reihenfolge. An dem Hörversuch nahmen 20 Personen aus dem Bereich „Entwicklung Abgasanlagen“ der Firma Eberspächer statt (4 weiblich und 16 männlich). Die subjektiven Bewertungen der Eigenschaften „rau“ und „sportlich“ wurden anhand einer 10er-Skala, in Anlehnung an VDI 2563, vorgenommen. Dabei steht „1“ für sehr wenig und „10“ für sehr stark ausgeprägt.

### Ergebnis

Bei den untersuchten Geräuschen spiegelten die Berechnungsergebnisse des Modells der „Motorrauigkeit“ das subjektive Rauigkeitsempfinden der Probanden deutlich besser wieder als das Modell der psychoakustischen Rauigkeit (Abb. 3 und 4). Sowohl die berechnete „Motorrauigkeit“ als auch die im Hörversuch ermittelte subjektive Rauigkeit der „Rau minus-Variante“ des Achtzylinders konnten im Vergleich zum Original reduziert werden (Abb. 5 und 6). Zudem wurde auch eine Reduktion der subjektiven Sportlichkeit beobachtet. Bei den beiden „Rau plus-Varianten“ der Sechszylinderfahrzeuge ergaben sich, relativ zu dem jeweiligen Original, sowohl in der subjektiven Bewertung der Rauigkeit als auch der Sportlichkeit höhere Werte. Somit kann von einem Zusammenhang zwischen der subjektiv empfundenen Rauigkeit eines Motorgeräusches als auch der bewerteten Sportlichkeit ausgegangen werden.

### Literatur

- [1] Zwicker, E.; Fastl, H.: Psychoacoustics - Facts and Models. Springer-Verlag Berlin, 2<sup>nd</sup> Ed. (1999).
- [2] Quang-Hue, V.: Soundengineering. Expert-Verlag Renningen-Malmsheim (1994).
- [3] Martner, O.; Zerbs, C.; Fey, U.; Kragl, R.; Müller, A.: Neues psychoakustisches Modell zur objektiven Bestimmung der Rauigkeit bei Verbrennungsmotoren. MTZ Motor-technische Zeitschrift 61 (2000), H. 10, S. 678-685.

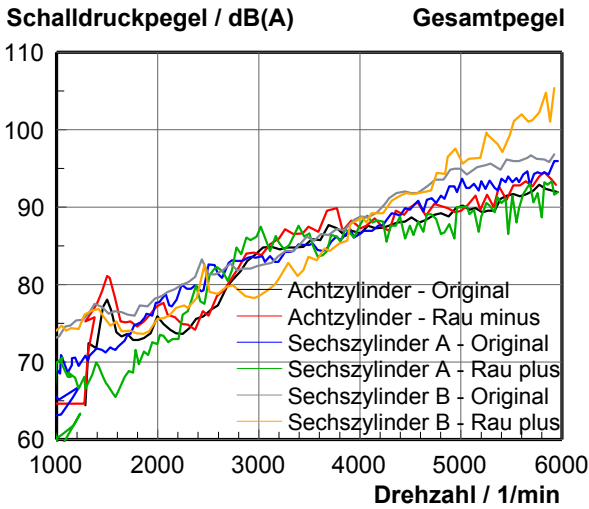


Abb. 1: A-bewertete Schalldruckpegel aller Varianten nach dem Pegelabgleich

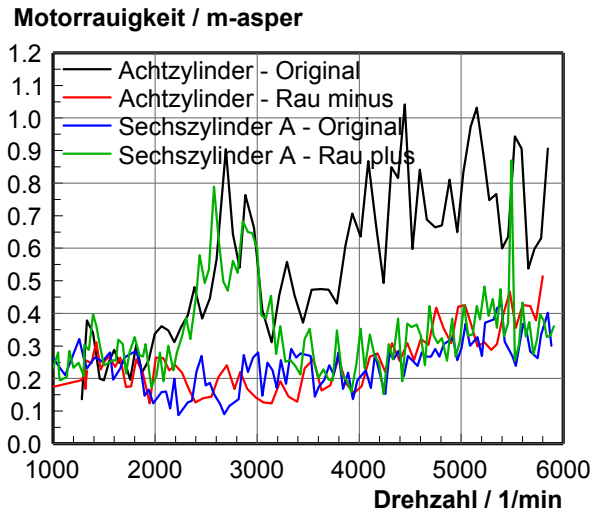


Abb. 4: Berechnete „Motorrauigkeiten“ ausgewählter Varianten

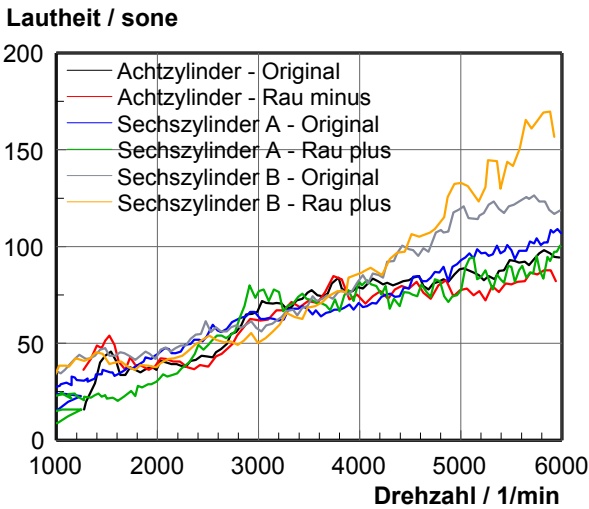


Abb. 2: Lautheiten aller Varianten nach dem Abgleich

Mittelwerte subjektive Bewertungen		
Fahrzeug	Rau	Sportlich
<b>8-Zylinder</b>	6.2	5.5
Rau minus	5.7	3.5
<b>6-Zylinder A</b>	4.7	4.0
Rau plus	5.9	5.3
<b>6-Zylinder B</b>	3.8	4.6
Rau plus	5.8	6.8

Abb. 5: Ergebnisse der subjektiven Bewertungen

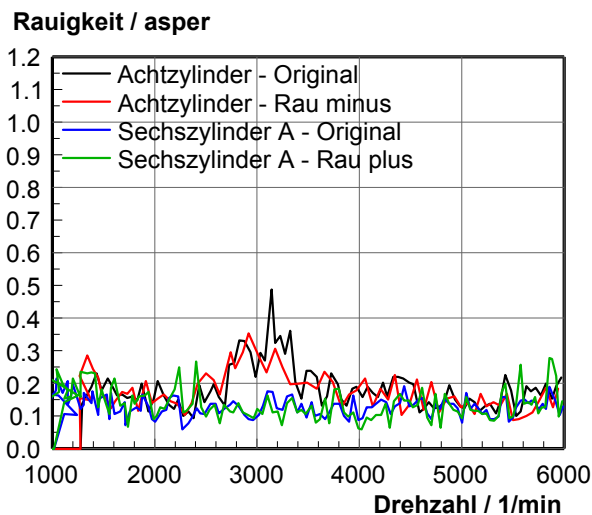


Abb. 3: Berechnete psychoakustische Rauigkeiten ausgewählter Varianten

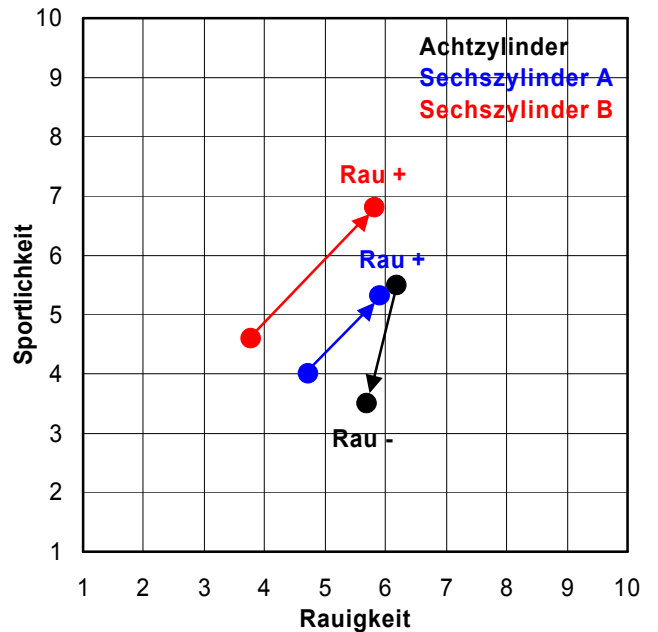


Abb. 6: Veränderungen der subjektiven Bewertungen durch die Ordnungsfilterungen